Regulación del escurrimiento con régimen hidrológico alterado

INTRODUCCIÓN

El estudio de la regulación del escurrimiento, a pesar de haber sido trabajado extensamente,[1-33] es un tema que conserva su actualidad, por una parte, debido a la complejidad implícita en la contradicción básica a resolver: el carácter aleatorio del aporte y el carácter (generalmente) determinístico de la demanda y, por otra parte, debido a las condiciones, siempre en evolución, del entorno económico, social y ecológico asociados.

El tema del trasvase de un embalse a otro, en su influencia sobre el cálculo de la regulación, ha sido poco estudiado con profundidad y detalle, en particular el que se refiere al trasvase de vertimientos, con excepción de un trabajo de Bandini,[1] un estudio de Chanev[2] y el estudio de Francisco y Fonseca.[3]

El trabajo de Bandini se basa en un riguroso método gráfico- analítico que puede todavía considerarse de interés desde el punto de vista académico pero que ya puede ser sobrepasado a la luz del cómputo electrónico actual. Además tiene un enfoque determinístico.

El estudio de Chanev se reduce a una especulación teórica interesante y con fundamento lógico, pero sin posibilidades (en aquel momento) de comprobación experimental. Además, resulta complicada de asimilar y de aplicar en la práctica. Por esta razón, en el presente trabajo se ha adoptado otra línea de pensamiento más comprensible y aplicable como se verá después. El estudio de Francisco se analiza más adelante en el caso de estudio.

Este trasvase pretende que el embalse que recibe sea capaz de aprovechar esos vertimientos de forma útil. Cuando el aprovechamiento es efectivo se dice que se ha logrado el efecto de cascada. De lo contrario, los vertimientos solo transitan por el embalse receptor, el que también los vierte.

Resumen / Abstract

Se reporta el estudio de la regulación del escurrimiento de un río mediante un embalse, en el caso en que el escurrimiento de entrada al embalse está formado por la suma del aporte natural de su cuenca asociada y de los vertimientos procedentes de otro embalse situado aguas arriba sobre el mismo río o en una cuenca vecina. A los efectos de este estudio es indiferente que el trasvase de estos vertimientos se conduzca por gravedad o por bombeo. Para el cálculo preciso de los índices de la regulación de dicho embalse se ha preparado un programa de computación que permite estudiar cualquier caso que se presente en la práctica. Se incluyen la metodología a emplear para una aplicación concreta de dicho programa, el estudio de un caso real incluyendo el análisis del único (según alcance de la bibliografía consultada) estudio anterior existente sobre el tema con algún basamento empírico y la valoración cuantitativa general del escurrimiento alterado del caso estudiado

Palabras clave: regulación del escurrimiento, embalse

The study of a special river runoff regulation by means of a reservoir is reported in this paper. The input runoff to the reservoir is composed of two terms: one is the natural runoff from its associated watershed and the second is the spilled excess water from an upstream reservoir located in the same river or in a neighboring basin. This water transport is usually driven by gravity but for this paper it is the same if it is driven by pumping. The reservoir regulation parameters are calculated herein by means of a specially developed computer program. This program gives the solution of most cases that may appear in practice. Included in this report can be found: the methodology for the practical application of the computer program, the case study of a real two-reservoir system including the analysis of a former paper related to this case study, a quantitative assessment of the so-called cascade effect

Key words:river runoff regulation, reservoir

José Bienvenido Martínez Rodríguez, Ingeniero Civil, Profesor Titular, Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, Ciudad de La Habana
bienvenido@cih.cujae.edu.cu

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los métodos tradicionales[4-6] abordan el caso de la cascada de una forma lógica y precisa para la época en que fueron desarrollados, mediante el método llamado del embalse ficticio. Si bien es cierto que ese método permite determinar aproximadamente si existe o no el efecto de cascada, así como los principales índices de la regulación de ambos embalses, tampoco es menos cierto que hay casos en que quedan dudas y, en cualquier caso, no permite calcular una medida cuantitativa de ese efecto si se produce.

Ahora se pretende resolver el problema de forma general aprovechando la poderosa herramienta de cálculo de las computadoras, dando solución precisa a cualquier caso y ofreciendo una forma cuantitativa de valorar el efecto de cascada. El estudio anterior[3] sobre el tema resulta limitado como se discute más adelante en el caso de estudio.

El problema a resolver aquí es, pues, el siguiente. Partiendo de que:

• Se tienen dos embalses, que se denominan A y B, ubicados sobre una misma cuenca o en cuencas adyacentes.

• El embalse A envía sus aguas vertidas, por gravedad o bombeo, hacia el embalse B. Sobre esta base se puede convenir que el embalse A se denomine embalse vertiente y el embalse B se denomine embalse receptor.

• Se conocen todos los datos del escurrimiento en los cierres de los embalses A y B. Particularmente se acepta que, dada la cercanía geográfica de los embalses, los escurrimientos naturales en ambos son perfectamente sincrónicos (probabilísticamente hablando). Desde el punto de vista estadístico, esto significa admitir como cierta la hipótesis de la correlación perfecta entre los escurrimientos anuales que fluyen hacia ambos cierres. Como es sabido, esta hipótesis es conservadora (está del lado de la seguridad).

• Se conocen todos los datos de los embalses incluyendo las entregas para satisfacer las demandas de sus usuarios, que se suponen constantes de un año a otro.

Se plantean como objetivos:

• Conocer, de forma cuantitativa y precisa, cuáles son los índices de regulación del embalse B, cuyo escurrimiento natural se encuentra alterado por los vertimientos del embalse A.

• Evaluar si se produce el efecto de cascada y, si se produce, conformar alguna evaluación cuantitativa que lo represente de forma racional.

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA COMPUTACIONAL

Se ha preparado un programa computacional denominado KAX para el cálculo de los parámetros de la regulación del escurrimiento en el caso de embalses de alta regulación (regulación anual e hiperanual) a partir del conocimiento del escurrimiento de entrada (natural o alterado) al embalse.

Se emplea el método de Kritski y Menkel para obtener una solución inicial del problema, cuya solución final se obtiene después mediante el método de simulación, que resuelve la ecuación de balance mensual de agua del embalse durante un período simulado de 1 000 años.

Para garantizar que se cumpla la hipótesis de la correlación perfecta entre los escurrimientos anuales de los embalses, KAX genera siempre la misma serie de 1 000 números aleatorios reales comprendidos en el intervalo 0-1. El informe original[7] se acompaña del manual de usuario del sistema KAX donde se ofrecen todos los detalles específicos del programa.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo contempla la aplicación del sistema KAX tantas veces como embalses se encuentren conectados. Como en la práctica el caso más frecuente es el de dos embalses, la explicación que sigue se refiere a este caso. No obstante, si hay más embalses, se pueden tomar dos a dos y aplicar el mismo procedimiento descrito.

La secuencia de cálculo es la siguiente:

1. Se introducen los datos del embalse A (vertiente) en su directorio correspondiente y se ejecuta la corrida de KAX. Aquí se obtienen todos los índices de la regulación del embalse A. En esta corrida, además, se crea un fichero con los vertimientos mensuales del embalse A.

2. Se introducen los datos del embalse B (receptor) en su directorio correspondiente y se copia el fichero de vertimientos del embalse A en el directorio de datos del embalse B. Para ello hay que cambiar el nombre de este fichero según se explica en el manual de usuario.

3. Se ejecuta la corrida del embalse B, la cual lee el fichero de vertimientos mensuales del embalse A y los añade a su escurrimiento natural de entrada. De esta forma la regulación del embalse B se efectúa teniendo en cuenta ambas entradas y, por lo tanto, los índices de regulación que se obtienen para el embalse B reflejan esta condición.

Si se quisiera realizar una comparación de los índices de regulación del embalse B en las dos situaciones: (I) trabajando sin recibir y (II) recibiendo los vertimientos, se puede obtener la primera situación si se omite, en la secuencia anterior, el paso de copiar el fichero de vertimientos del embalse A y la segunda situación siguiendo dicha secuencia tal como ha sido descrita.

En caso de realizar la comparación es recomendable tener dos directorios, con nombres distintos, para el embalse B, con el fin de tener por separado los resultados de ambas situaciones para el embalse B.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio seleccionado es el de los embalses Los Palacios y La Juventud, pertenecientes al sistema arrocero Sur-Centro de la provincia de Pinar del Río, los que también fueron objeto del estudio de Francisco y

Fonseca.[3] Todos los datos básicos necesarios se tomaron de dicho estudio.[3] No es necesario reproducir aquí la descripción físico-geográfica ni la climatología regional de la zona, ya que aparecen resumidas convenientemente en el estudio anterior.[3] Los datos utilizados se dan en la tabla 1.

La tabla 4 contiene las curvas de variación volumétrica obtenidas de la topografía del vaso de cada embalse (datos tomados de gráficos presentados en la referencia 3).

La estimación de las pérdidas de agua desde el embalse, en opinión del autor, no han sido consideradas de forma adecuada en el estudio anterior.[3] En primer lugar,

Tabla 1
Datos del escurrimiento anual del embalse y garantía de la demanda

Nombre	W_m	C_v	Año hidrológico	V_{mto}	V_{total}	K_{filtr}	Garantía
Los Palacios	84,20	0,40	May-Abr	5,0	45,5	0,12	75 %
Juventud	152,70	0,45	May-Abr	12,0	105,0	0,12	75 %

La tabla 1 resume los datos generales donde:
W_m : Norma del escurrimiento medio anual.
C_v : Coeficiente de variación del escurrimiento medio anual.
Año hidrológico: Ordenamiento de los meses del año hidrológico.
V_{mto}: Volumen muerto del embalse.
V_{total}: Capacidad total del embalse.
K_{filtr} : Coeficiente anual global de pérdidas totales desde el embalse (ver más adelante).
Garantía : Garantía anual de la demanda.

Las tablas 2 y 3 expresan las distribuciones mensuales del escurrimiento y la demanda que se explican por sí solas.

porque se han despreciado las pérdidas por filtración desde el embalse y, en segundo lugar pero mucho más importante, porque las pérdidas efectivas por evaporación se han estimado descontando toda la lluvia que cae sobre el embalse, lo cual implica desconocer el hecho de que una parte de esa lluvia ya está contada en el escurrimiento que llega al embalse. Este desconocimiento da lugar a hacer un conteo doble de ese aporte y, por ende, a resultados que no están del lado de la seguridad.

Como que la cuantificación de las pérdidas no representa un aspecto crítico en el caso estudiado, para corregir el problema señalado anteriormente, en el presente estudio se adoptó una simplificación considerando un coeficiente global de pérdidas (K_{filt}) de modo que incluyera ambos

Tabla 2
Datos de la distribución mensual del escurrimiento (en tanto por ciento) para años típicos de afluencia anual (%)

Prob.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Total
25 %	9,1	16,7	8,2	6,9	19,0	22,1	7,4	3,0	2,4	1,5	1,0	2,7	100
Medio	7,0	13,4	12,3	10,2	20,1	16,7	6,7	3,7	3,3	2,5	2,2	1,9	100
75 %	6,2	12,3	10,7	13,2	22,6	15,3	9.2	3,0	2,4	2,2	1,6	1,3	100

Tabla 3
Datos de la distribución mensual de la demanda anual constante de cada embalse (%)

Nombre	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Total.
Los Palacios	11,5	10,1	10,4	11,7	8,1	6,9	4,6	6,6	6,9	6,8	7,6	8,8	100
Juventud	10,8	9,8	10,0	14,8	8,0	4,0	3,8	6,8	6,3	6,7	10,2	8,8	100

tipos de pérdidas. El valor adoptado para dicho coeficiente se obtuvo por tanteos de modo que resultaran valores anuales de pérdidas ligeramente mayores que las reportadas en el estudio anterior.[3]

Tabla 4
Curvas características de los embalses

Los Palacios		La Juventud	
Cota H(m)	Volumen (hm^3)	Cota H (m)	Volumen (hm^3)
55	1,00	35	2,00
60	3,00	40	9,00
65	9,50	45	18,5
70	22,0	50	92,0
75	45,5	55	161,0

Con todos estos datos se prepararon los directorios con los ficheros de datos de los embalses Los Palacios y Juventud con el programa KAX. Para el caso de Juventud se prepararon cuatro directorios de datos: *uno*, considerando que no recibe vertimientos; *dos*, considerando que recibe vertimientos; *tres*, con una capacidad total mayor que la que posee actualmente sin recibir vertimientos y *cuatro*, recibiendo vertimientos con la misma capacidad mayor supuesta. Los resultados se discuten a continuación.

RESULTADOS

Los principales resultados se muestran resumidos en la tabla 5. La primera fila contiene los principales índices de regulación del embalse Los Palacios, la segunda, los de Juventud operando solo, es decir, sin recibir vertimientos y la tercera los índices de Juventud para el caso en que recibe los vertimientos.

Las columnas W_m y C_v son los parámetros estadísticos de la serie simulada de 1 000 años de escurrimientos anuales. Las demás columnas significan:

R: Entrega anual constante para satisfacer la demanda (hm^3).

P: Promedio anual de pérdida total de agua desde el embalse (hm^3).

Vert: Promedio anual de vertimiento de agua desde el embalse (hm^3).

Def: Promedio anual del déficit de agua en la entrega (hm^3).

V_f: Promedio anual de volumen de llenado del embalse al final del año (hm^3).

V_{med}: Promedio anual de volumen de llenado medio mensual del embalse (hm^3).

H_{med}: Promedio anual de la cota del llenado medio mensual del embalse (hm^3).

G_{anual}: Garantía anual efectiva en los 1 000 años simulados (%).

G_{mes}: Garantía mensual efectiva en los 1 000 años simulados (%).

Los valores de W_m y C_v de la serie simulada son muy similares a los datos de partida, lo cual era de esperarse. Los valores de W_m y C_v de la tercera fila corresponden al escurrimiento alterado en el cierre Juventud.

El análisis del efecto de cascada se puede efectuar comparando las filas segunda y tercera de la tabla 5. Véase que el W_m de la tercera fila es exactamente igual al W_m de la segunda más el vertimiento promedio de Los Palacios. El C_v del escurrimiento alterado crece porque ahora los años húmedos en Juventud tienen un escurrimiento mayor, mientras que los secos se quedan igual.

Se puede observar que las columnas de P, Def, V_f, V_{med}, H_{med} y las dos garantías son prácticamente iguales en las filas segunda y tercera. La columna que mejor expresa el efecto de cascada es la de los vertimientos V_{ert}.

Tabla 5
Resultados de las corridas con el programa KAX

Nombre	W_m	C_v	R	P	Vert	Def	V_f	V_{med}	H_{med}	G_{anual}	G_{mes}
Los Palacios	84,20	0,382	68,63	3,56	14,40	2,39	22,40	29,65	71,00	75,80	93,67
Juventud (solo)	152,70	0,430	125,34	8,01	24,30	4,96	52,36	66,71	48,07	76,60	93,60
Juventud (cascada)	167,10	0,513	125,34	8,04	38,63	4,93	52,61	66,99	48,09	76,70	93,62

Se observa que si se suman las dos primeras filas se obtiene un valor de 38,70 hm³ mientras que el vertimiento de la tercera fila es solo ligeramente menor (38,63 hm³). Esto significa evidentemente que Juventud vierte prácticamente TODO lo que recibe de Los Palacios, es decir, no regula casi nada de dichos vertimientos, o sea, NO existe el efecto de cascada.

Se podría definir un índice E_Q que cuantifique (en %) el efecto de cascada de la forma siguiente:

E_Q = (Vertimiento regulado)/(Vertimiento recibido) · 100

Para el caso en estudio su valor sería:

E_Q = (14,40 + 24,30 - 38,63) / 14,40 · 100
E_Q = 0,5 %

que realmente resulta un valor prácticamente despreciable.

Otra forma de analizar los resultados es mediante su representación gráfica. El sistema KAX produce ficheros con extensión (.WNT) y (.VAN) para cada corrida efectuada. El fichero (.WNT) contiene los 1000 valores anuales del escurrimiento natural que arriba al embalse, mientras que el fichero (.VAN) contiene los 1000 valores anuales del vertimiento.

Utilizando y combinando los ficheros (.WNT) de Los Palacios y Juventud se obtuvieron las figuras 1 y 2. De forma similar con los ficheros (.VAN) se obtuvieron las figuras 3 y 4.

Si se comparan los resultados de la tabla 5 con los reportados en el informe anterior[3] y resumidos en la tabla 6, se observa lo siguiente:

• Los resultados de la tabla 5 son más favorables en general (mayor entrega, garantía,etc) a pesar de tener mayores pérdidas. Esto es cierto pero puede atribuirse a que los C_v de las corridas de KAX son ligeramente menores.

• En la tabla 5 hay mucha mayor información sobre los índices de regulación de los embalses.

• El vertimiento de Los Palacios es menor en la tabla 5 lo cual también pudiera ser causado por el menor C_v.

• El valor de C_v del escurrimiento alterado es mucho mayor en la tabla 6 que en la tabla 5 debido a que el procedimiento de cálculo utilizado en el informe hidrológico es aproximado mediante fórmulas y, por tanto, propenso a errores. El resultado de la tabla 6 es un procesamiento estadístico de 1000 años que difícilmente pueda cuestionarse su precisión.

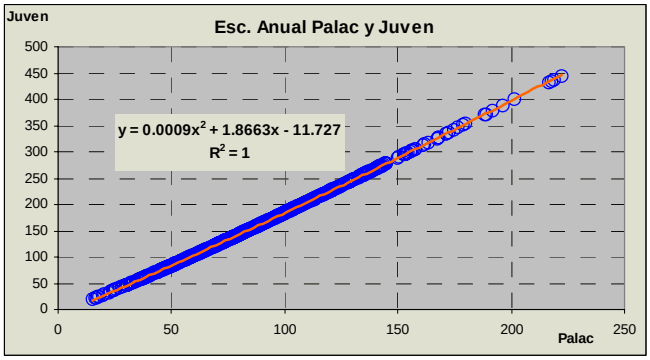


FIG. 1

La figura 1 muestra el gráfico de los 1000 escurrimientos anuales naturales en ambos embalses. Se observa la ecuación de correlación que, aunque parabólica, es casi lineal.

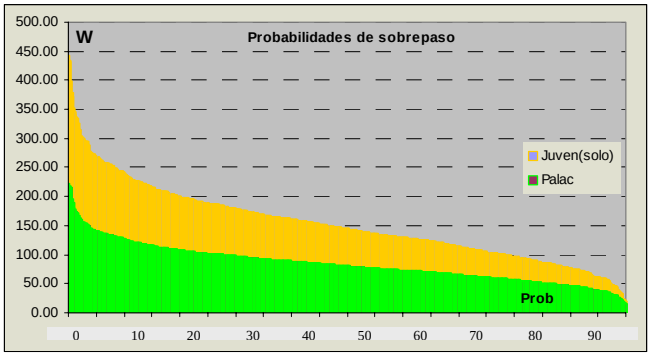


FIG. 2

La figura 2 representa los mismos 1 000 valores de escurrimiento (fig. 1) pero en forma de curva de probabilidades de sobrepaso para cada embalse.

Tabla 6
Resultados presentados en el informe anterior

Nombre	W_m	C_v	R	P	Vert	Def	V_f	V_{med}	H_{med}	G_{anual}	G_{mes}
Los Palacios	84,20	0,40	67,60	3,30	15,3			29,3		75	
Juventud (solo)	152,70	0,45	123,70	7,30				67,8		75	
Juventud (cascada)	168,00	0,549	123,70	7,30				67,8		75	

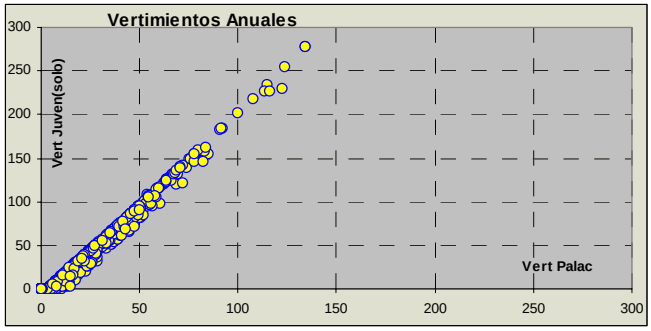


FIG. 3 ***Relación entre los 1 000 vertimientos del embalse Los Palacios y los correspondientes del embalse Juventud.***

La figura 3 ilustra la relación entre los 1 000 vertimientos del embalse Los Palacios y los correspondientes del embalse Juventud, cuando este actúa solo, es decir, sin recibir vertimientos. Se observa una ligera dispersión que puede explicarse por el diferente grado de regulación que ostenta cada embalse. La pendiente general aquí es "igual" que la de la figura 1 (¿por qué?).

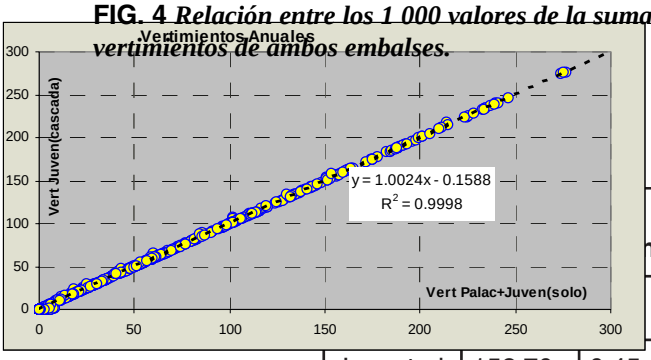
La figura 4 ilustra la relación entre los 1 000 valores de la suma de los vertimientos de ambos embalses (Los Palacios + Juventud solo) y los vertimientos del embalse Juventud, cuando este actúa en cascada, es decir, recibiendo vertimientos. Aquí prácticamente no existe dispersión (y la pendiente ≈ 1), lo que indica que casi no hay diferencia de comportamiento entre enviar o no los vertimientos desde Los Palacios hasta Juventud.

CASO HIPOTÉTICO CON AUMENTO DE CAPACIDAD EN JUVENTUD

Con el fin de enriquecer el análisis y mostrar las posibilidades de trabajo del sistema KAX se han hecho corridas con un hipotético valor de capacidad de embalse en Juventud como si este se hubiera recrecido. Los valores numéricos empleados se presentan en la tabla 7.

En la tabla 8 que sigue se presentan los resultados resumidos para este hipotético caso. Los resultados completos, tal como los produce el sistema KAX, se presentan en los anexos. La primera fila reproduce idénticamente la de la tabla 5 para el embalse Los Palacios. Las otras dos filas corresponden al embalse Juventud supuestamente recrecido en sus dos situaciones: sin recibir y recibiendo los vertimientos.

FIG. 4 ***Relación entre los 1 000 valores de la suma de los vertimientos de ambos embalses.***



ntud supuestamente recrecido

			Año hidrológico	V_{mto}	V_{total}	K_{filtr}	Garantía
Juventud	152,70	0,45	May-Abr	12,0	160,0	0,12	75 %

Tabla 8
Resultados de las corridas con embalse Juventud supuestamente recrecido

Nombre	W_m	C_v	R	P	Vert	Def	V_f	V_{med}	H_{med}	G_{anual}	G_{mes}
Los Palacios	84,20	0,382	68,63	3,56	14,40	2,39	22,40	29,65	71,00	75,80	93,67
Juventud (solo)	152,70	0,430	137,00	10,15	11,83	6,28	69,72	84,62	49,3	75,80	92,63
Juventud (cascada)	167,10	0,513	139,00	10,57	23,92	6,40	72,93	88,06	49,58	76,40	92,60

Lo más interesante a destacar en este caso es el cálculo del índice del efecto de cascada E_Q :

$$E_Q = (14{,}40 + 11{,}83 - 23{,}92) / 14{,}40 \cdot 100$$
$$E_Q = 16\ \%$$

valor que resulta considerablemente mayor que en el caso anterior y evidenciando que ahora sí se produce el efecto de cascada.

Aunque quizás pueda dar la impresión de ser todavía un efecto relativamente pequeño, en realidad no se puede argumentar aún en cuanto a establecer los valores que definen un efecto grande o pequeño por ser esta la primera vez que se propone dicho índice y Juventud ser el primer embalse en que se calcula.

No obstante, para este caso, analizando un poco el aspecto económico, véase que el incremento en la entrega es bastante bajo (de 137-139) que debía coincidir con el vertimiento regulado (no coincide porque las garantías no son idénticas).

Las figuras 5 y 6, que son las homólogas de las figuras 3 y 4, representan esta otra situación. Véase la mayor dispersión en esta caso, por el efecto regulador del embalse Juventud recrecido.

También se observan unas "pendientes" predominantes en la nube de puntos de ambos gráficos que se corresponden con lo dicho en ese sentido en las figuras homólogas (figuras 3 y 4).

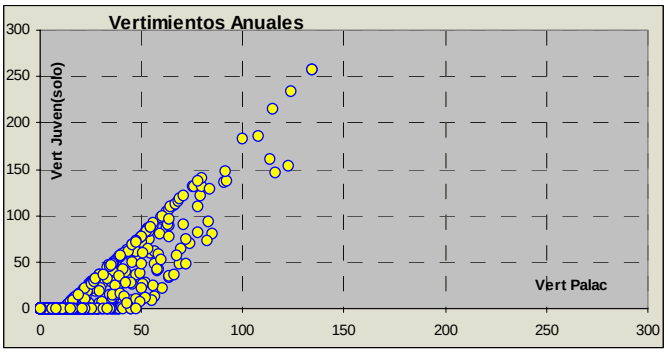


FIG. 5

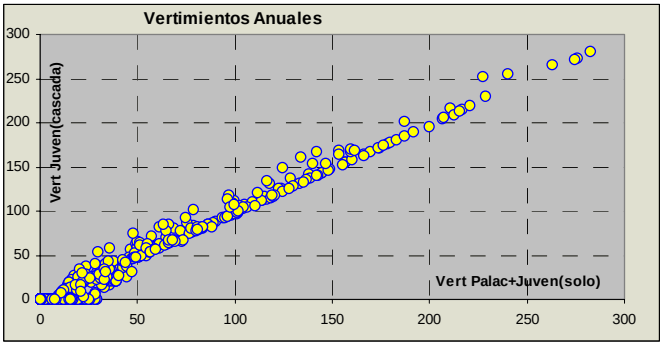


FIG. 6

CONCLUSIONES

El sistema KAX empleado en este estudio permite conocer, de forma cuantitativa y precisa, cuáles son los índices de regulación de un embalse A con escurrimiento natural conocido.

El sistema KAX empleado en este estudio permite conocer, de forma cuantitativa y precisa, cuáles son los índices de regulación de un embalse B, cuyo escurrimiento natural se encuentra alterado por los vertimientos de otro embalse A.

Adicionalmente, como ha quedado demostrado, es posible evaluar si se produce el efecto de cascada y conformar un criterio cuantitativo que lo represente en la forma del índice EQ.

El sistema KAX produce ficheros de resultados adecuados para un análisis gráfico posterior que facilita la interpretación de dichos resultados.

El estudio anterior[7] presenta algunas insuficiencias que fueron superadas en el presente trabajo, entre otras, la cantidad de índices de regulación y los parámetros estadísticos del escurrimiento alterado.

Resulta posible analizar situaciones hipotéticas en cuanto a la capacidad de un embalse para poder pronosticar cuál será su comportamiento esperado.

Aunque no se ha ilustrado en detalle en este trabajo, puede ser evidente la posibilidad del uso del sistema KAX para abordar situaciones más complejas como la aplicación en caso de cascadas múltiples, el análisis de diseño de embalses nuevos, etcétera.

REFERENCIAS

1. **BANDINI, A.:** "Regulación de los caudales de cursos de agua y las potencias aprovechables, por intermedio de embalses en derivación o cadena", *La Ingeniería*, Publicación del Centro Argentino de Ingenieros, Nos. 908/911, Buenos Aires, 1951.
2. **CHANEV, S.:** Ejercicios de hidroeconomía, Grupo Hidroenergético Nacional, DAP, Dirección General de Riego y Drenaje, INRA, La Habana, 1976.
3. **FRANCISCO, F. Y L. A. FONSECA:** Informe hidrológico: Actualización de los escurrimientos medios natural y alterado para el estudio de prefactibilidad de las CHE La Juventud, Los Palacios y La Paila, INRH, Empresa de Investigación y Proyecto Habana, Grupo Nacional Hidroenergética, 1997.
3. **BAYAZIT, M.:** Ideal Reservoir Capacity as a Function of Yield and Risk", *J. Hydrology*, 58, pp. 1-9, 1982.
4. **GRIGOROV, S.:** "Cálculos hidroeconómicos", Conferencias, Empresa de Proyectos de Obras Hidráulicas, Ciudad de La Habana, 1978.
5. **KRITSKI, S.N. AND M.F. MENKEL:** "Raschoti mnogoletnovo regulirovanie rechnovo stoka na osnove

teori viroyatnostei, Tr. VISU", Guidrotej. *Sbornik*, No. 4, Moscú, 1932.

6. **PHATARFOD, R. M.:** "Discretization in Stochastic Reservoir Theory with Markovian Inflows, *J. Hidrology,* 52, pp. 199-218, 1981.
7. **MARTÍNEZ, J. B.:** "Regulación del escurrimiento con régimen hidrológico alterado", Informe Técnico, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, noviembre del 2000.
8. **CABRANES, V. Y A. PATTERSON:** "Optimización para la operación del complejo hidráulico Sur-Centro de Pinar del Río", Informe Final, CIH-Inst. Hidroeconomia, Ciudad de La Habana, 1988.
9. **HASHIMOTO, T., J. R. STEDINGER AND D.P. LOUCKS:** "Reliability, Resilience and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation". *Water Research*, 18(1), pp. 14-20, 1982.
10. **JHONES, E. Y V. CABRANES:** "Sistema automatizado para optimizar la operación de conjuntos hidráulicos", Informe Técnico, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, 1989.
11. **KLEMES, V.:** "Discrete Representation of Storage for Stochastic Reservoir Optimization". *Water Research*, 13(1), pp. 149-158, 1977.
12. **ABRÉU, M. E.:** "Estudio y optimización del balance hídrico del sistema Durán-San Pedro", Trabajo de Diploma, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, 1985.
13. **BECERRIL, E.:** "La regulación de los ríos, Cons. Sup. Invest. Cientif., Madrid, 1959.
14. **KRITSKI, S.N. AND M.F. MENKEL:** "Mnogoletneye regulirovanie stoka", *Guidrotej. Stroit.*, No. 11, Moscú, 1935.
15. ——— **:** Vodojozyaystvennye Raschoty. Guidrometeoizdat, Moscú, 1952.
16. **MARTÍNEZ, J. B.:** "La optimización de la operación a corto plazo de sistemas hidráulicos existentes", Tesis Doctoral, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, 1977.
17. ——— **:** "La optimización de la operación a corto plazo de sistemas hidráulicos existentes", *Ingeniería Hidráulica*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, No. 5 (agosto), pp. 18-35, Ciudad de La Habana,1979.
18. ——— **:** "Métodos para el cálculo de la regulación del escurrimiento con el apoyo de la computación electrónica", *Ingeniería Hidráulica*, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 3(2), pp. 127-166, Ciudad de La Habana, 1982.
19. ——— **:** "Modelo de programación lineal del sistema de Pinar del Río", Informe Técnico, CIH-Inst. de Hidroeconomía, Ciudad de La Habana, 1982.
20. ——— **:** *Métodos para el cálculo de la regulación del escurrimiento fluvial*, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, 1983.
21. ——— **:** *El gráfico de despacho para la operación de embalses existentes*, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, 1983.
22. ——— **:** "Operación del sistema sur-centro de Pinar del Río", Informe Técnico, CIH-Inst. de Hidroeconomía, Ciudad de La Habana, 1983.
23. ——— **:** "La operación óptima de sistemas de embalses: balance hídrico", *Ingeniería Hidráulica*, Vol. I, No. 2, pp. 152-160, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, 1984.
24. ——— **:** "Regulación del escurrimiento con cálculos hidrológicos en dos períodos, *Ingeniería Hidráulica*, Vol. V, No. 2, pp. 229-240, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría,Ciudad de La Habana, 1984.
25. **PLESHKOV, A. F.:** *Bystri i tochni raschot vodojranilish*, *Guidrotej. Stroit.*, No. 6, Moscú, 1936.
26. ——— **:** *Regulirovanie Rechnovo Stoka, Guidrometeoizdat*, Leningrado, 1972.
27. **SAVARENSKI, A.D.:** "Metod raschota regulirovaniya stoka", *Guidrotej. Stroit.*, No. 2, Moscú, 1940.
28. **SIERRA, R.:** "Optimización del sistema hidráulico Durán-San Pedro", Trabajo de Diploma, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, 1986.
29. **SIMONOVIC, S.:** "Reliability Programming in Reservoir Management: Computer Programs, Transactions of the Jaroslav Cerni", Inst. Devel. *Wat. Res.*, Belgrado, 26(73-76), 1-6, 1983.
30. **SUÁREZ, R.:** "Optimización del sistema hidráulico Minerva-Pavón", Trabajo de Diploma, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, 1986.
31. **SVANIDZE, G. G.:** *Matematicheskoe Modelirovanie Guidrologuicheskij Riadov.* Guidro-meteoizdat, Leningrad, 1977.
32. **VOGEL, R.M. AND J. R.:** "Stedinger Generalized Storage-Reliability-Yield Relationships", *J. Hydrology*, 89, 303-327, 1987.
33. **YEH, W. W-G. AND L. BECKER:** "Multiobjective Analysis of Multireservoir Operations", *Water Research*, 18 (5), 1326-1336, 1982.

Recibido: enero del 2003
Aprobado: febrero del 2003